中国生态农业学报 2016 年 6 月 第 24 卷 第 6 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jun. 2016, 24(6): 725−735

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.151331

硅磷配施对低磷土壤春玉米干物质积累、分配及产量的影响*

朱从桦[1,2] 张嘉莉[1] 王兴龙[1] 张 頔[1] 康云海[1] 孔凡磊[1,2] 袁继超[1,2**]

(1. 四川农业大学农学院 成都 611130; 2. 农业部西南作物生理生态与耕作重点实验室 成都 611130)

摘 要 以玉米品种'正红 2 号'和'正红 115'为材料，通过 2014 年和 2015 年的田间小区定位试验，研究低磷土壤条件下，硅磷肥配施对玉米拔节期和吐丝期的净光合速率、蒸腾速率和叶面积指数，拔节期、吐丝期、灌浆期和成熟期干物质积累和分配，产量及产量构成因素的影响，探讨施硅及硅磷配施的增产效果。结果显示，与对照(不施磷肥和硅肥)相比，施磷、施硅和硅磷配施处理均可提高玉米拔节期和吐丝期的叶面积指数和净光合速率，增加拔节期、吐丝期、灌浆期和成熟期各生育阶段的干物质积累量，降低灌浆期和成熟期叶片的干物质分配比例和灌浆期茎鞘的干物质分配比例，提高籽粒干物质分配比例和收获指数，降低秃尖长度，增加穗长，最终提高穗粒数、千粒重和籽粒产量；其中施用磷肥增加或降低上述指标的效应明显大于施用硅肥，硅磷配施增加或降低上述指标的效应又明显大于单施磷肥或单施硅肥，硅和磷表现出明显的协同作用和配合效应。2014 年和 2015 年玉米籽粒产量均与拔节期、吐丝期、灌浆期和成熟期干物质积累量呈显著正相关；与单施磷肥相比，硅磷配施处理分别增产 1 288.57 $kg\cdot hm^{-2}$(2014 年)和 1 313.61 $kg\cdot hm^{-2}$(2015 年)，且 2015 年的增幅明显大于 2014 年，硅、磷表现出稳定的增产效应。综上所述，在四川丘陵低磷土壤条件下，合理进行硅磷肥配施，既能提高玉米生育前期物质生产能力和干物质积累量，又能改善生育后期干物质在玉米各器官中的分配，促进籽粒灌浆结实，最终提高籽粒产量。

关键词 低磷土壤 玉米 硅肥 磷肥 光合生产 干物质积累 产量
中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2016)06-0725-11

Effects of combined application of silicon and phosphorus fertilizers on dry matter accumulation and distribution and grain yield of spring maize in low phosphorus soils*

ZHU Conghua[1,2], ZHANG Jiali[1], WANG Xinglong[1], ZHANG Di[1], KANG Yunhai[1], KONG Fanlei[1,2], YUAN Jichao[1,2**]

(1. College of Agronomy, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology, and Cultivation in Southwest, Ministry of Agriculture, Chengdu 611130, China)

Abstract In order to explore the benefits of combined application of silicon and phosphate on maize production, a field plot experiment was conducted from 2014 to 2015. The effects of different rates of phosphate and silicon fertilizers application on leaf area index, net photosynthetic rate and transpiration rate at jointing and silking stages, dry matter accumulation in different organs at jointing, silking, grain-filling and maturity stages, and grain yield and yield components of spring maize were investigated using maize varieties 'ZH2' and 'ZH115' in low phosphorus soils. Compared with control plot (P_0Si_0), net

* 国家科技支撑计划项目(2012BAD04B13-2)和公益性行业(农业)科研专项(20150312705)资助
** 通讯作者: 袁继超，主要从事农作制度与作物生理生态研究。E-mail: yuanjichao5@163.com
朱从桦，主要从事作物高产优质高效栽培理论与技术研究。E-mail: zchsicau@163.com
收稿日期: 2015−12−17 接受日期: 2016−02−19

* Supported by the National Key Technology R&D Program of China (2012BAD04B13-2) and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest (20150312705)
** Corresponding author, E-mail: yuanjichao5@163.com
Received Dec. 17, 2015; accepted Feb. 19, 2016

photosynthetic rate and leaf area index at jointing and silking stages increased significantly under application of phosphorus, silicon fertilizers and the combined application of both fertilizers. Also dry matter accumulation at jointing, silking, grain-filling and maturity stages, dry grain weight ratio at grain-filling and maturity stages, and grains per ear, spike length, 1000-kernel weight and gain yield increased under the above three fertilization treatments. However, dry weight ratio of leaf at filling and maturity stage, dry weight ratio of stem and sheath at grain-filling stage and bare top length decreased. Specifically for phosphorus fertilization treatment, the increases or reductions in the above mentioned parameters were more obvious than those for silicon fertilization treatment. The largest changes were found in the combined application of phosphorus and silicon fertilizers. There was a significantly synergic effect on the investigated parameters between phosphorus fertilizer and silicon fertilizer. Furthermore, grain yield of corn was positively related with dry matter accumulation at jointing stage, silking stage, grain-filling stage and maturity stage in 2014–2015. Compared with phosphorus fertilizer treatment, grain yield increased by 1 288.57 kg·hm^{-2} (in 2014) and 1 313.61 kg·hm^{-2} (in 2015) under combined phosphorus and silicon fertilization treatment. This indicated that there was a sustainable increase in yield due to the combined application of phosphorus and silicon fertilizers. In summary, dry matter accumulation and photosynthesis improved during the early growth stage, dry matter distribution rate in each plant part was optimized during the later growth stage, and maize yield eventually increased by the combined application of phosphorus and silicon fertilizers in low available phosphorus soils in the hilly uplands of Sichuan Basin.

Keywords Low phosphorus soil; Maize; Silicon fertilizer; Phosphorus fertilizer; Photosynthesis; Dry matter accumulation; Yield

植物通过光合作用合成并积累有机物质，作物经济产量受生物产量和经济系数影响。目前，玉米(*Zea mays*)生产中主要收获对象是籽粒，玉米籽粒产量与干物质积累量关系密切[1]。高产玉米群体吐丝期至成熟期干物质积累量占整个生育期的 60%以上，籽粒产量主要来自生育中后期叶片等器官合成和茎叶等器官的物质转移，灌浆中后期物质合成、积累和分配对经济产量的影响最大[2−3]。通过增加密度[4]、优化施肥[5]、选育良种[3]、优化栽培方式[6]等提高玉米干物质积累，改善玉米光合生产能力，调控干物质在各器官的分配，进而获得高产，其中又以优化施肥最为普遍和关键。在四川丘陵区，近年来开展测土配方施肥，土壤磷含量有所增加，但缺磷土壤依然普遍存在[7−8]，粮油作物生产依旧需要大量施用磷肥[9]。然而，当前农业生产中磷肥用量持续增长，全球磷矿资源储量有限，按当前每年磷肥平均用量估算磷矿资源将在未来 50 年内被耗竭[10]。过量施肥、忽视土壤养分来源和利用、作物产量潜力未充分挖掘及减少土壤养分流失等措施少是我国肥料利用效率低的主要原因。目前我国主要粮食作物的磷肥利用率较低，仅为 7.%~20.1%[11−12]。玉米是需磷较多的作物，对缺磷环境也非常敏感。施用磷肥能增加玉米各器官干物质积累[5]，增强光合能力[13]，提高植株对氮、磷和钾等养分积累[14−17]，增加玉米产量。硅对玉米等作物的生长有益，玉米各器官硅含量约为 4~75 g·kg^{-1}，各器官氮、磷、钾含量与其硅含量呈一定正相关[18−19]，施硅能改善作物对硅、氮、磷和钾等养分吸收利用[20−22]，提高作物光合生产能力[23]，增加作物干物质积累[24]和产量[25−28]。硅和磷由于相似的化学性质可能存在肥效的互促关系，有研究认为硅能缓解玉米的低磷胁迫[29−31]，施硅能改善土壤及作物体内养分环境[32−33]。此外，硅肥储量大，生产加工技术日渐成熟，又鉴于硅对作物生长具有诸多的益处[19]，可见其在农业可持续发展、节能减排农业中应用前景广阔。在四川丘陵旱地，硅磷肥配施能否改善玉米光合生产，能否提高干物质积累量，能否优化生育后期干物质分配，能否提高玉米产量尚待进一步的探索。本研究以玉米品种‘正红 2 号’和‘正红 115’为材料，在低磷土壤条件下，研究硅磷配施对玉米主要生育期物质合成、积累和分配特征及产量的影响，以期为制定氮、磷、钾和硅肥配套高产技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

于 2014 年和 2015 年在四川省简阳市芦葭镇英明村(属丘陵二台地，土层瘠薄，雨养旱地)进行两年定位试验，试验点(30°70′N，103°86′E)为亚热带湿润气候，热量充沛，年均温 16~18 ℃，10 ℃以上活动积温 5 500~6 000 ℃，无霜期 280~350 d，常年降雨量 900~1 000 mm，但降雨分布不均匀，主要分布在 6 至 8 月份。本试验两年均为春播，2014 年和 2015 年玉米整个生育期(4—7 月)气温变化和降雨量分布见图 1。试验地土壤为紫色砂泥岩母质发育而成的棕紫泥土，pH 为 7.68±0.15，有机质含量 15.58 g·kg^{-1}，碱解氮 34.09 mg·kg^{-1}、速效磷 4.92 mg·kg^{-1}、速效钾

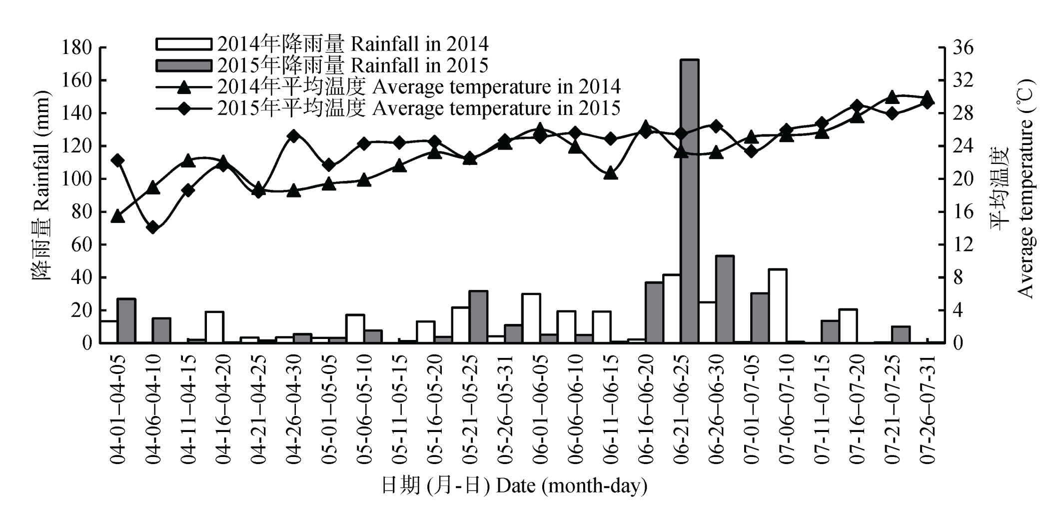


图 1 2014 年和 2015 年玉米生长季(4—7 月)每 5 d 的降雨量和平均温度

Fig. 1 Rainfall and average temperature in every 5 days from April to July of maize growing season in 2014 and 2015

124.50 mg·kg^{-1}, 有效硅 210.93 mg·kg^{-1}, 属于低磷、少硅土壤。

玉米品种选用‘正红 2 号’和‘正红 115’[29], 分别于 2014 年 3 月 28 日育苗, 4 月 1 日单株(叶龄 2 叶 1 心)移栽, 采用宽窄行栽培方式, 即宽行 1.6 m, 窄行 0.4 m, 株距 0.2 m, 种植密度约为 50 000 株·hm^{-2}, 2014 年 7 月 29 日收获; 2014 年 10 月 25 日冬季播种小麦以进一步消耗地力(不施用任何肥料), 2015 年 3 月 25 日拔除小麦植株并整地, 2015 年 4 月 3 日点播, 也采用宽窄行栽培方式, 即宽行 1.6 m, 窄行 0.4 m, 株距 0.2 m, 4 月 21 日定苗(每穴留壮苗 1 株), 种植密度约为 50 000 株·hm^{-2}, 2015 年 7 月 26 日收获。试验采用裂区设计, 品种为主区因素, 设置 2 个玉米品种‘正红 2 号’和‘正红 115’, 肥料组合为副区因素, 设 4 种硅、磷肥组合, 即 P_0Si_0: 施磷(P_2O_5)0 kg·hm^{-2}, 施硅(SiO_2)0 kg·hm^{-2}; P_0Si_{75}: 施磷(P_2O_5)0 kg·hm^{-2}, 施硅(SiO_2)75 kg·hm^{-2}; $P_{60}Si_0$: 施磷(P_2O_5)60 kg·hm^{-2}, 施硅(SiO_2)0 kg·hm^{-2}; $P_{60}Si_{75}$: 施磷(P_2O_5)60 kg·hm^{-2}, 施硅(SiO_2)75 kg·hm^{-2}。磷肥为过磷酸钙(P_2O_5≥12%), 硅肥为迈乐土壤调理剂(SiO_2≥20%, 山西迈乐肥业有限责任公司提供), 设置 3 次重复, 共 24 个小区, 小区面积为 17 m^2。

2014 年和 2015 年小区分布和试验处理均相同, 所有小区纯氮(尿素, 含氮量≥46%)180 kg·hm^{-2}、K_2O(氯化钾, 含 K_2O≥60%) 90 kg·hm^{-2}, 施用硅肥带入的钾从钾肥中等量扣除, 未施用硅肥处理用氯化钙和氯化镁等量补充钙和镁。氮、磷、钾和硅肥全做底肥, 将各小区所施肥料混匀后撒施于窄行上面, 然后覆土 5~8 cm, 并用水浇透 0~25 cm 土壤。2014 年于起垄覆膜后第 3 d 选择长势一致的壮苗, 撬窝单苗带土移栽; 2015 年于起垄覆膜后第 2 d 直接播种(每穴 2 粒), 两年均在大喇叭口期揭去地膜。其余田间管理措施同当地大面积高产田块。

1.2 测定项目与方法

叶面积指数和干物质重测定, 分别于拔节期(2014 年 5 月 8 日和 2015 年 5 月 11 日)、吐丝期(2014 年 6 月 8 日和 2015 年 6 月 17 日)、灌浆期(2014 年 7 月 2 日和 2015 年 7 月 12 日)和成熟期(2014 年 7 月 29 日和 2015 年 7 月 26 日), 每个小区选取代表性植株 5 株, 用长宽系数法(校正系数定为 0.75)测定叶面积(拔节期和吐丝期); 然后取地上部分, 分叶、苞叶(灌浆期和成熟期)、茎鞘、雄穗(吐丝期、灌浆期和成熟期)、穗轴(灌浆期和成熟期)、籽粒(灌浆期和成熟期), 放入烘箱中, 105 ℃杀青 30 min, 80 ℃烘干至恒重, 再称重。

净光合速率和蒸腾速率测定, 分别于拔节期、吐丝期, 选择晴天上午 10:00 左右使用便携式光合测定系统 LI-6400(美国 LI-COR 公司生产)进行测定。拔节期测定顶部向下第 1 全展叶, 吐丝期测定穗位叶。测定时人工控制条件为: CO_2浓度 400 μmol·mol^{-1}, 温度 30 ℃, 光照强度 1 200 μmol·m^{-2}·s^{-1}, 每处理测定 5 片, 重复测定 3 次。

考种与计产, 成熟期每个小区连续选取 20 个果穗, 调查穗长、穗粗、穗行数、行粒数、秃尖长、千粒重, 并按田间实收株数计产。

1.3 参数计算

叶(苞叶、茎鞘、雄穗、穗轴、籽粒)干物质比例(%)=叶(苞叶、茎鞘、雄穗、穗轴、籽粒)干物重(kg·hm^{-2})/地上部干物重(kg·hm^{-2})×100

1.4 数据统计分析方法

本研究所列结果为 3 次重复测定值的平均值, 数据采用 DPS 7.05 和 SPSS 19.0 软件进行方差分析、

多重比较及相关性分析。

2　结果与分析

2.1　硅磷肥配施对玉米叶面积指数、净光合速率和蒸腾速率的影响

从表 1 可见，‘正红 2 号’和‘正红 115’两个玉米品种拔节期和吐丝期的叶面积指数(LAI)、净光合速率(P_n)和蒸腾速率无显著差异，肥料组合却显著影响着以上各指标。两年试验中，施磷肥和施硅肥均能显著提高玉米 LAI 和 P_n，总体上看施磷肥对 P_n 的提高效应大于硅肥，施硅肥会不同程度降低叶片蒸腾速率。2014 年，施磷肥处理(P_{60})的 LAI 和 P_n 较不施磷肥处理在拔节期、吐丝期(两个品种平均)分别提高 22.53%、6.18%和 41.82%、32.42%；施硅肥处理(Si_{75})的 LAI 和 P_n 较不施硅肥处理分别提高 12.03%、8.92%和 19.90%、16.86%；硅磷肥配施处理($P_{60}Si_{75}$)的 LAI 和 P_n 较对照处理(P_0Si_0)分别提高 41.88%、15.64%和 68.80%、56.55%，磷肥和硅肥表现出明显的配合效应。无论是‘正红 2 号’还是‘正红 115’，硅磷肥配施扩大 LAI 和提高 P_n 的作用最大，同时还能一定程度降低蒸腾速率。2015 年试验结果和 2014 年变化趋势基本一致。

表 1　硅磷肥配施对玉米拔节期和吐丝期叶面积指数、净光合速率及蒸腾速率的影响

Table 1　Effects of different combined application of phosphorus and silicon fertilizers on leaf area index, net photosynthetic rate and transpiration rate of maize at jointing and silking stages

年份 Year	品种 Cultivar	肥料组合 Fertilizer combination	叶面积指数 Leaf area index		净光合速率 Net photosynthetic rate [μmol(CO_2)·m^{-2}·s^{-1}]		蒸腾速率 Transpiration rate [mmol(H_2O)·m^{-2}·s^{-1}]	
			拔节期 Jointing	吐丝期 Silking	拔节期 Jointing	吐丝期 Silking	拔节期 Jointing	吐丝期 Silking
2014	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	0.60±0.08ab	3.84±0.06b	13.13±0.41c	17.07±0.10d	2.83±0.67b	5.59±0.14b
		P_0Si_{75}	0.58±0.04b	4.35±0.37a	13.79±1.97c	21.77±1.09c	2.64±0.39b	4.73±0.01c
		$P_{60}Si_0$	0.72±0.07a	4.45±0.06a	17.37±1.15b	25.60±1.39b	3.43±0.28a	6.37±0.36a
		$P_{60}Si_{75}$	0.67±0.08ab	4.41±0.32a	21.83±0.57a	28.92±1.60a	2.92±0.09b	5.68±0.10b
		平均 Average	0.64A	4.26B	16.53A	23.34A	2.96A	5.59A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	0.43±0.02b	4.50±0.06b	11.93±0.12d	19.60±1.72d	2.41±0.05c	6.20±0.36a
		P_0Si_{75}	0.67±0.23a	4.81±0.74ab	15.26±0.68c	23.15±0.43c	2.12±0.15c	5.02±0.51b
		$P_{60}Si_0$	0.66±0.06a	4.46±0.09b	17.09±0.84b	25.05±1.05b	3.59±0.19a	6.45±0.68a
		$P_{60}Si_{75}$	0.74±0.17a	5.24±0.14a	20.44±0.63a	28.16±0.98a	3.20±0.16b	5.53±0.08b
		平均 Average	0.62A	4.76A	16.17A	24.18A	2.83A	5.80A
	F-值 *F*-value	C	0.06^{ns}	37.07^{*}	0.64^{*}	2.40^{ns}	0.69^{ns}	3.13^{ns}
		FC	6.11^{*}	4.52^{*}	92.64^{**}	87.74^{**}	24.50^{**}	17.02^{**}
		C×FC	3.10^{ns}	1.89^{ns}	2.86^{ns}	2.11^{ns}	4.31^{*}	1.10^{ns}
2015	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	0.61±0.15d	2.75±0.53c	17.02±2.79d	23.88±0.49c	2.39±0.37c	3.07±0.58c
		P_0Si_{75}	0.83±0.20c	2.90±0.30bc	21.86±2.21c	24.95±2.19c	2.90±0.27b	4.29±0.26b
		$P_{60}Si_0$	1.25±0.12b	3.31±0.08ab	24.02±0.56b	27.61±2.60b	3.71±0.19a	5.43±0.20a
		$P_{60}Si_{75}$	1.49±0.24a	3.65±0.19a	26.85±1.88a	31.08±2.53a	3.16±0.21b	4.61±0.31b
		平均 Average	1.05A	3.15A	22.44A	26.71A	3.05A	4.35A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	0.68±0.13d	2.94±0.50b	16.35±0.75d	22.65±2.40c	2.49±0.16c	3.15±0.21d
		P_0Si_{75}	0.91±0.14c	3.02±0.59b	18.78±1.80c	24.57±1.64c	3.23±0.50b	4.05±0.63c
		$P_{60}Si_0$	1.10±0.19b	3.57±0.41a	23.62±0.86b	27.89±1.93b	3.82±0.43a	5.36±0.22a
		$P_{60}Si_{75}$	1.46±0.16a	3.69±0.20a	25.85±0.71a	31.93±0.35a	3.23±0.14b	4.64±0.28b
		平均 Average	1.04A	3.30A	21.15A	26.76A	3.08A	4.30A
	F-值 *F*-value	C	0.02^{ns}	0.42^{ns}	4.48^{ns}	0.82^{ns}	0.09^{ns}	0.15^{ns}
		FC	54.75^{**}	8.87^{**}	65.91^{**}	23.02^{**}	29.97^{**}	40.13^{**}
		C×FC	1.20^{ns}	0.12^{ns}	1.38^{ns}	0.36^{ns}	0.67^{ns}	0.18^{ns}

P_0Si_0：施磷(P_2O_5)0 kg·hm^{-2}，施硅(SiO_2)0 kg·hm^{-2}；P_0Si_{75}：施磷(P_2O_5)0 kg·hm^{-2}，施硅(SiO_2)75 kg·hm^{-2}；$P_{60}Si_0$：施磷(P_2O_5)60 kg·hm^{-2}，施硅(SiO_2)0 kg·hm^{-2}；$P_{60}Si_{75}$：施磷(P_2O_5)60 kg·hm^{-2}，施硅(SiO_2)75 kg·hm^{-2}。C：品种；FC：肥料组合。同列不同小写字母表示同一品种同一年不同施肥组合差异显著(P<0.05)，同列不同大写字母表示同一年不同品种差异显著(P<0.05)。*和**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。下同。

P_0Si_0: application rates of phosphorus (P_2O_5) and silicon (SiO_2) were 0 kg·hm^{-2}. P_0Si_{75}: application rates of phosphorus (P_2O_5) and silicon (SiO_2) were 0 kg·hm^{-2} and 75 kg·hm^{-2}, respectively. $P_{60}Si_0$: application rates of phosphorus (P_2O_5) and silicon (SiO_2) were 60 kg·hm^{-2} and 0 kg·hm^{-2}, respectively. $P_{60}Si_{75}$: application rates of phosphorus (P_2O_5) and silicon (SiO_2) were 60 kg·hm^{-2} and 75 kg·hm^{-2}, respectively. C: cultivar; FC: fertilizer combination. Different lower cases letters in a column indicate significant differences at 0.05 level among different fertilizer combinations of a cultivar in the same year. Different capital letters in a column indicate significant differences at 0.05 level among different cultivars. * and ** mean significant difference at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

2.2　硅磷肥配施对玉米干物质生产特征的影响

2.2.1　主要生育时期玉米群体干物质积累量

从表 2 可见，‘正红 2 号’和‘正红 115’在拔节期、吐丝期、灌浆期和成熟期的干物质积累量差异不显著。肥料组合对‘正红 2 号’和‘正红 115’主要生育期干物质积累量和收获指数的影响趋势基本一致。两个品种 4 个时期(拔节期、吐丝期、灌浆期和成熟期)平均，施磷肥处理的干物质积累量比不施磷肥处理增加 18.20%(2014 年)和 78.86%(2015 年)，施硅肥处理的干物质积累量比不施硅肥处理增加 12.61% (2014 年)和 20.98%(2015 年)，硅磷肥配施处理($P_{60}Si_{75}$)的干物质积累量比对照(P_0Si_0)增加 34.74% (2014 年)和 121.23%(2015 年)。2015 年试验中，施硅、施磷和硅磷配施均能显著提高收获指数。可见，施磷肥、施硅肥均能提高玉米主要生育期干物质积累量，硅磷肥配施对玉米各生育期干物质积累量的增幅显著大于单施磷肥或硅肥。因此，在低磷土壤条件下，硅磷肥配施能显著提高玉米各关键生育期干物质积累量，为夺得高产提供物质基础。

表 2　硅磷肥配施对玉米不同生育期群体干物质积累量及收获指数的影响

Table 2　Effects of different combined application of phosphorus and silicon fertilizers on dry matter accumulation of population at different growth stages and harvest index of maize

年份 Year	品种 Cultivar	肥料组合 Fertilizer combination	干物质积累量 Dry matter accumulation (kg·hm^{-2})				收获指数 Harvest index (%)
			拔节期 Jointing stage	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	成熟期 Maturity stage	
2014	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	284.86±32.72c	4 526.63±76.32c	7 338.49±511.03c	12 374.01±608.78c	50.09±2.56a
		P_0Si_{75}	319.86±23.77bc	5 593.83±386.55b	8 963.99±661.29b	13 701.59±381.95b	45.43±2.16b
		$P_{60}Si_0$	350.96±35.77b	5 825.39±314.79a	8 949.11±448.06b	14 114.67±526.68b	48.64±2.71a
		$P_{60}Si_{75}$	436.40±50.57a	5 896.16±259.82a	9 581.49±432.61a	15 280.47±480.23a	48.35±1.89ab
		平均 Average	348.02A	5 460.50A	8 708.27A	13 867.68A	48.13A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	187.43±12.92b	4 371.87±222.43d	7 923.37±407.87c	12 913.88±948.13c	43.82±3.48a
		P_0Si_{75}	282.03±74.29a	4 968.17±210.87c	8 832.01±760.15b	14 624.08±704.37b	39.09±1.61b
		$P_{60}Si_0$	304.08±28.16a	5 376.80±25.69b	9 227.85±1 074.66ab	14 763.23±437.29ab	43.60±1.69a
		$P_{60}Si_{75}$	313.47±70.05a	5 719.93±124.08a	9 661.87±720.53a	15 549.86±886.09a	45.10±1.62a
		平均 Average	271.75A	5 109.19A	8 911.27A	14 462.76A	42.90A
	F-值 *F*-value	C	3.75^{ns}	13.81^{ns}	0.34^{ns}	3.27^{ns}	13.47^{ns}
		FC	17.40**	89.42**	37.96**	26.88**	6.59**
		C×FC	2.15^{ns}	3.21^{ns}	1.24^{ns}	0.37^{ns}	0.71^{ns}
2015	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	288.76±89.99d	3 260.73±230.30d	5 474.63±1 194.25d	7 231.31±736.06cd	32.99±2.04b
		P_0Si_{75}	420.08±124.18cd	4 067.26±347.12c	7 753.02±1 011.80c	8 225.95±545.47c	36.26±3.36b
		$P_{60}Si_0$	698.39±59.57b	5 553.72±223.02b	10 792.46±444.01b	11 285.96±1 021.63b	47.27±4.02a
		$P_{60}Si_{75}$	859.71±55.10a	6 537.43±222.40a	12 769.10±644.28a	12 954.17±448.93a	46.55±4.38a
		平均 Average	566.73A	4 854.79A	9 197.30A	9 924.35A	40.77B
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	324.01±87.93d	3 423.88±360.40cd	5 222.94±596.45d	6 583.69±1 015.40d	42.09±4.00b
		P_0Si_{75}	414.67±98.31cd	4 004.27±621.75c	7 197.07±837.55c	7 588.87±965.52cd	45.73±3.52ab
		$P_{60}Si_0$	544.70±102.48c	5 611.52±414.16b	11 235.00±587.12b	12 649.58±300.89a	43.72±1.60ab
		$P_{60}Si_{75}$	716.55±127.11b	6 700.58±485.61a	12 562.78±972.59a	13 290.50±191.98a	46.19±0.59a
		平均 Average	499.98A	4 935.06A	9 054.45A	10 028.16A	44.43A
	F-值 *F*-value	C	4.08^{ns}	0.23^{ns}	0.22^{ns}	0.14^{ns}	77.77**
		FC	41.97**	79.95**	116.70**	119.78**	8.39***
		C×FC	2.10^{ns}	0.11^{ns}	0.47^{ns}	2.99^{ns}	5.44**

收获指数=收获产量/成熟期干物质积累量。Harvest index is defined as the grain yield divided by total dry matter accumulation at maturity.

2.2.2　主要生育阶段玉米群体干物质积累量

从表 3 可见，施肥对玉米各生育阶段的干物质积累量均有影响，贯穿整个生育期，吐丝—成熟期干物质积累量占整个生育期的 47.35%~66.09%，两品种的表现基本一致。2014 年播种—拔节期施磷($P_{60}S_0$)、施硅(P_0Si_{75})和硅磷肥配施($P_{60}Si_{75}$)处理两品种平均干物质积累量分别较对照(P_0Si_0)高 42.72%、31.38%和 60.22%，拔节—吐丝期分别高 25.14%、

表 3 硅磷配施对玉米不同生育阶段干物质积累的影响

Table 3 Effects of different combined application of phosphorus and silicon fertilizers on dry matter accumulation of population and its ratio to total dry matter in different growth periods of maize

年份 Year	品种 Cultivar	肥料组合 Fertilizer combination	播种—拔节 Sowing–jointing		拔节—吐丝 Jointing–silking		吐丝—成熟 Silking–maturity	
			DMA ($kg\cdot hm^{-2}$)	RTT (%)	DMA ($kg\cdot hm^{-2}$)	RTT (%)	DMA ($kg\cdot hm^{-2}$)	RTT (%)
2014	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	284.86±32.72c	2.28±0.19b	4 241.77±84.73b	34.10±1.59b	7 930.71±562.83b	63.62±1.46a
		P_0Si_{75}	319.86±23.77bc	2.34±0.22b	5 273.97±383.07a	38.47±2.05a	8 107.76±280.62b	59.19±2.10bc
		$P_{60}Si_0$	350.96±35.77b	2.49±0.32b	5 474.42±350.30a	38.80±2.29a	8 289.28±500.08b	58.71±2.13c
		$P_{60}Si_{75}$	436.40±50.57a	2.85±0.26a	5 459.76±307.85a	35.80±3.13b	9 384.31±737.64a	61.35±2.91ab
		平均 Average	348.02A	2.49A	5 112.48A	36.79A	9 353.57A	60.72A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	187.43±12.92b	1.45±0.04b	4 184.44±215.01d	32.45±1.49ab	8 542.01±772.61b	66.09±1.48a
		P_0Si_{75}	282.03±74.29a	1.93±0.49a	4 686.14±146.16c	32.07±1.10b	9 655.91±616.38a	66.00±1.46a
		$P_{60}Si_0$	304.08±28.16a	2.06±0.14a	5 072.71±100.29b	34.38±1.05ab	9 386.44±418.08ab	63.56±0.94ab
		$P_{60}Si_{75}$	313.47±70.05a	2.00±0.34a	5 406.46±150.63a	34.87±2.72a	9 829.93±939.49a	63.13±2.44b
		平均 Average	271.75A	1.86A	4 837.44A	33.44A	8 428.01A	64.70A
	F-值 *F*-value	C	3.75^{ns}	7.79^{ns}	4.49^{ns}	4.17^{ns}	4.62^{ns}	7.85^{ns}
		FC	17.40^{**}	6.44^{**}	71.03^{**}	4.16^{*}	5.92^{*}	3.50^{*}
		C×FC	2.15^{ns}	1.66^{ns}	4.25^{*}	3.56^{*}	1.17^{ns}	1.90^{ns}
2015	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	288.76±89.89d	3.95±0.97c	2 971.97±159.35d	41.23±2.05a	3 970.58±506.31d	54.82±1.35a
		P_0Si_{75}	420.08±124.18c	5.06±1.25b	3 647.18±248.37c	44.42±3.21a	4 158.69±434.20c	50.53±3.31ab
		$P_{60}Si_0$	698.39±59.57b	6.19±0.14a	4 855.33±186.94b	43.18±2.86a	5 732.24±842.14b	50.63±2.86ab
		$P_{60}Si_{75}$	859.71±55.10a	6.63±0.20a	5 677.72±235.45a	43.87±2.57a	6 416.74±499.44a	49.49±2.39b
		平均 Average	566.73A	5.46A	4 288.05A	43.17 A	5 069.56A	51.37A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	324.01±87.93c	4.92±1.09a	3 099.87±287.64c	47.40±3.29a	3 159.81±693.34b	47.68±3.86b
		P_0Si_{75}	414.67±98.31c	5.42±0.57a	3 589.60±524.42c	47.23±1.05a	3 584.61±347.64b	47.35±1.49b
		$P_{60}Si_0$	544.70±102.48b	4.30±0.72a	5 066.83±457.02b	40.06±3.58b	7 038.06±415.54a	55.64±3.06a
		$P_{60}Si_{75}$	716.55±127.11a	5.40±1.02a	5 984.03±563.32a	45.02±4.12a	6 589.92±501.81a	49.58±3.68b
		平均 Average	499.98A	5.00A	4 435.08A	44.93A	5 093.10A	50.06A
	F-值 *F*-value	C	1.12^{ns}	1.77^{ns}	1.87^{ns}	4.29^{ns}	0.02^{ns}	6.18^{ns}
		FC	74.92^{**}	5.15^{*}	59.97^{**}	2.31^{ns}	67.30^{**}	2.59^{ns}
		C×FC	3.75^{*}	5.53^{*}	0.22^{ns}	2.78^{ns}	6.11^{**}	4.20^{*}

DMA：干物质积累量；RTT：占总量的比例。DMA: dry matter accumulation; RTT: ratio to total.

18.16%和 28.96%；吐丝—成熟期分别高 7.20%、7.64%和 16.70%。2015 年播种—拔节期施磷($P_{60}S_0$)、施硅(P_0Si_{75})和硅磷肥配施($P_{60}Si_{75}$)处理的干物质积累量分别较对照(P_0Si_0)高 104.99%、36.73%和 159.44%，拔节—吐丝期分别高 63.41%、19.26%和 92.04%；吐丝—成熟期分别高 83.55%、9.09%和 85.08%。可见施用磷肥对干物质积累量的提高效应明显比硅肥大，而硅磷肥配施对玉米主要生育阶段干物质积累量的提高幅度比单施磷肥或单施硅肥都更大。从生育阶段干物质积累量分析，拔节—吐丝期是植株茎叶营养体快速生长并进行物质积累和功能构建的主要阶段，这个阶段供给足够多的养分是生产和积累更多的物质到籽粒中的关键。综上所述，硅、磷肥均作为基肥，并合理配施可以明显提高玉米主要生育阶段群体干物质积累量。

2.3 生育后期玉米各器官干物质分配特征

从表 4 可见，肥料组合不仅影响两供试玉米品种生育后期的干物质积累量，还影响各器官干物质的分配比例，其影响的趋势在品种间和年度间基本一致。总体而言，硅肥对玉米生育后期各器官干物质分配比例的影响较磷肥小，磷肥和硅磷配施有提高两供试品种灌浆期和成熟期籽粒干物质分配率、降低叶片分配率的趋势，特别是灌浆期和 2015 年。与对照(P_0Si_0)相比，两品种(两年平均)施磷和硅磷配施处理灌浆期、成熟期籽粒分配率分别提高 21.64%、5.33%和 28.80%、5.29%，相应的叶片分配率则分别降低 22.24%、8.24%和 23.30%、8.77%；施磷和硅磷配施还有降低灌浆期茎鞘干物质分配率的趋势，两品种两年平均分别降低 3.79%和 7.84%，但对成熟期茎鞘分配率则影响较小；进一步分析还发现，2015

表 4　硅、磷配施对玉米生育后期各器官干物质分配的影响

Table 4　Effects of different combined application of phosphorus and silicon fertilizers on dry weight ratio of different organs of maize at filling and mature stages　　%

年份 Year	品种 Cultivar	肥料组合 Fertilizer combination	叶比例 Ratio of leaf		苞叶比例 Ratio of bract		茎鞘比例 Ratio of stem and sheath		雄穗比例 Ratio of tassel		穗轴比例 Ratio of cob		籽粒比例 Ratio of grain	
			F	M	F	M	F	M	F	M	F	M	F	M
2014	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	21.74±1.92b	13.45±0.78a	8.27±0.89a	4.53±0.50a	37.42±0.99a	21.93±1.37a	1.20±0.10b	0.67±0.06ab	5.60±1.16a	8.02±0.14a	25.77±1.25b	51.40±0.93a
		P_0Si_{75}	23.85±0.98a	12.66±1.39ab	9.08±1.61a	4.62±0.27a	35.86±0.38ab	22.23±0.23a	1.50±0.17a	0.63±0.10ab	4.54±0.16ab	8.08±0.25a	25.16±2.65b	51.78±1.62a
		$P_{60}Si_0$	20.55±1.19b	12.80±0.58ab	9.01±0.39a	4.18±0.22a	34.74±1.58b	21.95±2.85a	1.31±0.08b	0.71±0.04a	5.13±0.77a	8.15±0.38a	29.26±1.16a	52.22±2.42a
		$P_{60}Si_{75}$	21.94±0.61b	12.19±0.37b	8.28±0.41a	4.23±0.33a	34.92±1.57b	23.33±0.63a	1.24±0.09b	0.61±0.04b	3.54±1.56b	8.05±0.03a	30.08±0.27a	51.58±0.19a
		平均 Average	22.02A	12.78A	8.66A	4.39A	35.73A	22.36A	1.32A	0.66A	4.70A	8.07A	27.57A	51.74A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	22.53±1.03a	11.95±0.76a	9.33±0.70a	4.63±0.23a	33.43±2.02a	23.16±1.95a	1.53±0.03a	0.72±0.03a	5.60±1.05a	8.04±0.24a	27.58±1.42bc	51.50±1.54a
		P_0Si_{75}	21.77±1.25ab	12.32±0.44a	10.28±0.77a	4.74±0.70a	34.79±1.75a	23.12±0.86a	1.48±0.09a	0.74±0.02a	4.95±0.43a	7.97±0.12a	26.74±2.69c	51.10±0.74a
		$P_{60}Si_0$	20.56±1.51ab	11.55±0.34a	9.20±1.34a	4.81±0.11a	34.82±0.57a	22.78±2.16a	1.39±0.03a	0.70±0.05a	4.87±0.32a	8.12±0.31a	29.16±3.24ab	52.04±2.01a
		$P_{60}Si_{75}$	19.78±2.06c	11.04±0.41a	9.09±2.06a	4.78±0.57a	35.10±1.54a	23.01±1.71a	1.40±0.13a	0.79±0.11a	4.83±0.50a	8.15±0.21a	29.80±2.13a	52.23±1.34a
		平均 Average	21.16A	11.71A	9.47A	4.74A	34.54A	23.02A	1.45A	0.74A	5.06A	8.07A	28.32A	51.72A
	F-值 *F*-value	V	1.03^{ns}	17.04^{**}	2.80^{ns}	4.35^{ns}	3.06^{ns}	0.75^{ns}	14.04^{ns}	6.88^{**}	6.49^{ns}	0.10^{ns}	0.93^{ns}	0.10^{ns}
		FC	3.73^{*}	2.22^{ns}	2.16^{ns}	0.24^{ns}	0.27^{ns}	0.28^{ns}	2.92^{ns}	0.10^{ns}	2.32^{ns}	0.34^{ns}	16.16^{**}	0.35^{ns}
		V×FC	1.82^{ns}	0.63^{ns}	0.54^{ns}	0.63^{ns}	3.08^{ns}	0.27^{ns}	2.67^{ns}	2.72^{ns}	0.79^{ns}	0.23^{ns}	1.30^{ns}	0.23^{ns}
2015	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	17.76±1.44a	13.21±1.21a	6.18±0.08a	6.98±1.43a	30.99±4.61a	26.34±2.10a	1.51±0.19a	1.13±0.18a	10.43±1.42a	9.62±0.62a	33.12±5.63b	42.72±3.25b
		P_0Si_{75}	14.65±1.40b	12.89±0.45a	4.15±1.09b	7.06±0.12a	28.67±2.06a	25.12±0.17ab	1.20±0.23b	1.01±0.15ab	7.78±1.19b	9.09±0.53a	43.55±5.10a	44.84±0.95b
		$P_{60}Si_0$	15.23±1.26b	12.68±0.82a	4.31±1.60b	6.15±0.31a	27.46±0.95a	23.46±1.11bc	0.98±0.13c	0.86±0.10bc	9.15±1.06ab	8.86±0.17a	42.86±2.00a	48.00±0.76a
		$P_{60}Si_{75}$	13.95±0.77b	12.19±0.12a	4.69±0.31b	6.31±0.25a	28.08±1.03a	22.99±0.50c	0.73±0.15d	0.69±0.02c	8.83±0.37ab	8.75±0.78a	43.72±1.48a	49.07±1.30a
		平均 Average	15.40A	12.74A	4.83A	6.63B	28.80A	24.48A	1.10A	0.92B	9.05A	9.08A	40.81A	46.16A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	21.71±2.62a	13.19±1.63b	5.55±0.96a	8.67±0.76a	32.69±2.60a	18.92±1.46b	1.76±0.23a	1.40±0.34a	10.91±1.54ab	11.95±0.36a	27.37±2.76c	45.88±0.46bc
		P_0Si_{75}	17.39±1.17b	15.01±0.74a	5.61±0.31a	8.64±1.98a	31.27±3.05ab	20.69±2.79ab	1.47±0.24b	1.39±0.21a	11.87±1.29a	10.60±2.54ab	32.39±4.90c	43.67±2.41c
		$P_{60}Si_0$	13.83±2.05c	10.97±0.07c	4.74±1.09a	6.91±0.86b	33.16±2.74a	22.79±1.68a	0.89±0.15c	0.79±0.02b	9.64±1.07b	9.76±0.14b	37.74±3.80b	48.78±0.87a
		$P_{60}Si_{75}$	14.20±1.55c	12.20±0.71bc	4.57±0.72a	6.37±1.24b	27.56±1.97b	22.89±1.33a	0.92±0.14c	0.89±0.13b	9.39±0.21b	9.69±0.28b	43.36±2.68a	47.96±1.75ab
		平均 Average	16.78A	12.84A	5.12A	7.65A	31.17A	21.32B	1.26A	1.12A	10.45A	10.50A	35.22A	46.57A
	F-值 *F*-value	C	1.75^{ns}	0.18^{ns}	0.60^{ns}	8.41^{ns}	3.56^{ns}	19.70^{*}	1.33^{ns}	32.17^{*}	9.10^{ns}	6.34^{ns}	4.72^{**}	0.15^{ns}
		FC	27.01^{**}	6.87^{**}	2.82^{ns}	3.47^{ns}	2.39^{ns}	0.12^{ns}	30.90^{**}	11.71^{**}	1.94^{ns}	3.22^{ns}	16.01^{**}	15.30^{**}
		C×FC	5.97^{**}	4.52^{*}	1.51^{ns}	0.77^{ns}	1.43^{ns}	8.74^{**}	1.75^{ns}	1.76^{ns}	3.35^{ns}	0.69^{ns}	2.44^{ns}	2.73^{ns}

F：灌浆期; M：成熟期。F: filling stage; M: mature stage.

年因干旱原因，两品种的收获指数和出籽率均较 2014 年降低，适量施用磷肥和硅磷肥配施可明显提高两供试品种的出籽量。

2.4 硅磷配施条件下玉米产量、产量构成及果穗性状的特征

从表 5 和表 6 可看出，肥料组合对玉米产量及产量构成存在显著影响。2015 年的产量较 2014 年低，两供试品种平均减产 42.20%。施用磷肥和施用硅肥均能增加玉米产量，其中磷肥的增产效应明显大于硅肥；硅磷配施的增产效果又明显优于单施磷肥或单施硅肥，硅肥和磷肥表现出明显的协同作用和配合效应。两品种(两年)平均，单施硅肥、单施磷肥和硅磷配施分别较对照(P_0Si_0)增产 12.87%、67.06%和 86.27%，其中 2015 年施肥处理增产幅度特别大，因为 2015 年的对照产量特别低。磷肥和硅磷配施增产的主要原因是促进了玉米的生长发育，增加了穗粒数(特别是行粒数)、穗长，同时也促进了灌浆结实，提高了千粒重，并降低了秃尖长度。两品种两年联合分析，玉米产量与穗粒数和千粒重均极显著正相关，相关系数分别为 0.958**和 0.979**。

表 5 硅磷肥配施对玉米产量及产量构成的影响

Table 5 Effects of different combined application of phosphorus and silicon fertilizers on grain yield and yield components of maize

年份 Year	品种 Cultivar	肥料组合 Fertilizer combination	产量 Grain yield (kg·hm^{-2})	行数 Rows per ear	行粒数 Grains per row	千粒重 1000-kernel weight (g)
2014	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	7 198.61±224.17c	15.83±0.25c	31.59±1.83b	306.30±1.54c
		P_0Si_{75}	7 240.92±478.89c	16.03±0.32bc	31.18±1.03b	307.89±2.66c
		$P_{60}Si_0$	7 972.74±144.28b	16.70±0.72a	31.39±2.08b	313.28±1.93b
		$P_{60}Si_{75}$	8 589.24±392.33a	16.43±0.25ab	33.92±1.68a	320.56±5.00a
		平均 Average	7 750.38A	16.25A	32.02A	312.01A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	6 554.71±54.44c	14.67±0.32a	32.12±2.82b	297.08±9.88c
		P_0Si_{75}	6 640.10±234.02c	14.43±0.15a	32.47±2.38b	305.73±9.88b
		$P_{60}Si_0$	7 478.85±137.02b	14.60±0.20a	33.60±0.48b	319.54±5.97a
		$P_{60}Si_{75}$	8 150.92±466.96a	14.17±0.15a	36.62±0.52a	322.75±10.00a
		平均 Average	7 206.15B	14.47B	33.70A	311.27A
	F-值 *F*-value	C	23.25**	185.39**	2.92^{ns}	0.02^{ns}
		FC	44.89**	2.28^{ns}	12.07**	41.14**
		C×FC	0.20^{ns}	3.68*	1.06^{ns}	5.52*
2015	正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	2 376.21±103.93d	13.76±0.53c	17.23±1.15d	245.69±14.70b
		P_0Si_{75}	2 974.17±206.64c	14.91±0.39b	20.28±0.40c	256.59±10.51b
		$P_{60}Si_0$	5 307.95±130.23b	16.16±0.53a	27.71±0.44b	283.32±6.83a
		$P_{60}Si_{75}$	6 017.03±357.85a	16.12±0.26a	31.16±1.34a	287.52±13.60a
		平均 Average	4 168.84A	15.24A	24.10B	268.28A
	正红 115 ZH115	P_0Si_0	2 744.52±169.28d	13.32±0.16b	19.70±0.41d	254.14±21.23b
		P_0Si_{75}	3 490.49±704.29c	12.92±0.38b	27.12±0.61c	246.77±28.97b
		$P_{60}Si_0$	5 533.51±325.63b	14.12±0.40a	31.94±1.21b	294.53±14.95a
		$P_{60}Si_{75}$	6 138.04±74.66a	14.26±0.18a	34.99±1.52a	292.83±5.86a
		平均 Average	4 476.64A	13.66B	28.44A	272.07A
	F-值 *F*-value	C	6.08^{ns}	175.15**	165.22**	0.44^{ns}
		FC	200.35**	28.93**	280.74**	25.68**
		C×FC	0.52^{ns}	5.89*	5.56*	1.13^{ns}

3 讨论和结论

光合作用是玉米能量和物质积累的基础，叶面积指数、叶片净光合速率等均是表征玉米光合生产能力的重要指标，受基因型[2]和栽培管理[6]等影响。施用磷肥、硅肥可以增加玉米叶片面积和叶片光合速率[13,23]。本研究结果表明，施用磷肥、硅肥和硅磷配施均能提高拔节期、吐丝期的叶面积指数和提高叶片净光合速率，表现为硅磷配施>单施磷肥>单施硅肥，这说明磷是植物进行能量代谢所必须的元素，具有不可替代性，充足的磷营养是玉米高产的关键；尽管硅在玉米体内的生理生化机理尚不清楚，但增施硅肥能通过直接或间接的作用，增强土壤磷的有效性[32−33]，改善玉米植株对氮、磷和钾养分的吸收[29,34]，

表 6　硅磷肥配施对玉米果穗性状的影响

Table 6　Effects of different combined application of phosphorus and silicon fertilizers on ear traits of maize

品种 Cultivar	肥料组合 Fertilizer combination	2014 穗长 Spike length (cm)	2014 秃尖长 Bare top length (cm)	2014 穗粗 Spike diameter (mm)	2015 穗长 Spike length (cm)	2015 秃尖长 Bare top length (cm)	2015 穗粗 Spike diameter (mm)
正红 2 号 ZH2	P_0Si_0	18.24±0.28c	3.63±0.19a	49.66±0.43b	12.50±1.25b	4.82±0.35a	39.02±1.23b
	P_0Si_{75}	18.85±0.83ab	3.74±0.25a	49.70±0.60b	13.06±0.71b	4.57±0.19a	41.50±0.59b
	$P_{60}Si_0$	18.63±0.5bc	2.90±0.25b	50.82±0.52a	15.74±0.87a	3.72±0.36b	47.31±0.68a
	$P_{60}Si_{75}$	19.32±0.41a	2.51±0.58b	50.25±0.13ab	15.69±0.66a	2.86±0.47c	48.25±1.47a
	平均 Average	18.76A	3.19A	50.11A	14.25A	3.99A	44.02A
正红 115 ZH115	P_0Si_0	17.73±0.14b	3.53±0.45a	48.03±1.34b	13.88±1.26b	4.95±1.58a	39.34±2.40b
	P_0Si_{75}	18.36±0.13b	3.51±0.23a	47.58±1.47b	14.53±0.84b	4.52±1.13a	38.97±3.13b
	$P_{60}Si_0$	19.14±0.63a	2.90±0.47b	48.48±1.27b	16.67±0.67a	3.39±0.65b	45.21±1.05a
	$P_{60}Si_{75}$	19.32±0.63a	2.28±0.47c	50.28±2.05a	16.68±0.69a	3.03±0.32b	45.70±2.37a
	平均 Average	18.64A	3.06A	48.59A	15.44A	3.97A	42.31A
F-值 *F*-value	C	0.23^{ns}	0.33^{ns}	3.71^{ns}	15.96^{**}	2.02^{ns}	9.15^{ns}
	FC	11.12^{**}	23.57^{**}	7.60^{**}	20.00^{**}	17.70^{**}	28.72^{**}
	C×FC	2.07^{ns}	0.50^{ns}	3.88^{ns}	0.15^{ns}	0.55^{ns}	0.83^{ns}

从而促进植株生长增加玉米叶面积，以及提高光合过程中相关酶活性来提高玉米光合速率，最终增加同化物的合成量。在拔节期，以上各施肥处理的蒸腾速率均显著高于对照(不施肥)，在拔节期和吐丝期，蒸腾速率表现为施磷处理明显高于不施磷处理，施硅处理低于不施硅处理，这说明施硅后玉米吸收的硅大部分沉淀在叶片，能够阻止水分的无效挥发，提高玉米水分利用效率，也为叶片高效合成积累物质提供基础保障。

充足的物质积累是玉米高产的保障，玉米籽粒产量与干物质积累量呈显著正相关，一定范围内，籽粒产量随干物质增加而增加，即干物质积累越多，籽粒产量也就越高。本研究结果表明，籽粒产量与拔节期、吐丝期、灌浆期和成熟期群体干物质积累量显著正相关，相关系数分别 0.753^{**}、0.766^{**}、0.625^{**}、0.580^{**}(2014 年)和 0.871^{**}、0.970^{**}、0.960^{**}、0.957^{**}(2015 年)。施肥管理是调控玉米群体干物质积累量和产量的有效途径，在生产中得到普遍应用，施用氮、磷、钾[5]和硅[20,25–28]等均能显著提高玉米成熟期干物质积累量，增加玉米产量。本研究表明，施用磷肥和硅肥均能提高玉米主要生育期干物质积累量和籽粒产量，均表现为硅磷配施>单施磷肥>单施硅肥；尽管与 2014 年相比，2015 年 5 月下旬至 6 月上中旬(玉米的幼穗分化发育和授粉阶段)和 7 月(灌浆结实阶段)的干旱更严重，以及前 2 季地力消耗严重，导致 2015 年所有处理玉米干物质积累量和产量明显下降，但是与单施磷肥相比，硅磷配施处理 2014 年和 2015 年的干物质增量和籽粒增量相近，并且 2015 年的增幅比 2014 年略高。这表明四川丘陵区雨养低磷土壤条件下，持续施用磷肥是保证玉米养分需求的关键因素，同时配合施用硅肥还能提高玉米抗旱、耐瘠能力，改善玉米氮、磷和钾营养[35]的同时还能提高玉米干物质积累量，优化改善生育中后期各器官物质分配量，从而提高收获期籽粒产量，硅磷肥配施表现出更好的稳、增产效应。

玉米籽粒产量还受生育中后期各器官物质分配和转移特性影响，物质在各器官的分配随生长中心的改变而变化，表现为：出苗至拔节前是叶片，拔节后至授粉前是叶茎鞘，授粉后是穗部，高产品种籽粒产量主要来源于生育后期叶片制造的光合产物[2–3]。玉米物质分配存在品种差异[3]，还受栽培管理的影响，施用磷肥[35]和硅肥[24]都会改变玉米各器官干物质分配。在四川丘陵区，玉米吐丝后约 15 d 内茎叶仍在持续积累物质，灌浆中后期茎叶鞘物质才开始向籽粒大量转移。本研究结果表明，与单施磷肥处理相比，硅磷配施并不能显著提高籽粒干物质分配比例，但是由于该处理干物质积累总量更高，促使其籽粒中干物质积累量更高；此外，硅磷配施还能增加穗长和穗粗，显著减少秃尖长度，增加穗粒数和千粒重。这说明硅磷配施通过提高干物质积累量，增强干物质向籽粒中转运和积累，促进灌浆结实，改善穗部性状是其增加产量的主要原因。综上所述，硅磷配施能够增加玉米叶面积和叶片净光合速率来提高光合生产能力，提高玉米适应低磷

土壤能力，提高干物质积累量，优化生育后期各器官干物质分配量，促进灌浆结实，改善穗部性状，提高籽粒产量。

参考文献 References

[1] 王永宏, 王克如, 赵如浪, 等. 高产春玉米源库特征及其关系[J]. 中国农业科学, 2013, 46(2): 257–269
Wang Y H, Wang K R, Zhao R L, et al. Relationship between the source and sink of spring maize with high yield[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(2): 257–269

[2] 孙雪芳, 丁在松, 侯海鹏, 等. 不同春玉米品种花后光合物质生产特点及碳氮含量变化[J]. 作物学报, 2013, 39(7): 1284–1292
Sun X F, Ding Z S, Hou H P, et al. Post-anthesis photosynthetic assimilation and the changes of carbon and nitrogen in different varieties of spring maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(7): 1284–1292

[3] 李飒, 彭云峰, 于鹏, 等. 不同年代玉米品种干物质积累与钾素吸收及其分配[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 325–332
Li S, Peng Y F, Yu P, et al. Accumulation and distribution of dry matter and potassium in maize varieties released in different years[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 325–332

[4] 刘伟, 张吉旺, 吕鹏, 等. 种植密度对高产夏玉米登海 661 产量及干物质积累与分配的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(7): 1301–1307
Liu W, Zhang J W, Lü P, et al. Effect of plant density on grain yield dry matter accumulation and partitioning in summer maize cultivar Denghai 661[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011, 37(7): 1301–1307

[5] 战秀梅, 韩晓日, 杨劲峰, 等. 不同氮、磷、钾肥用量对玉米源、库干物质积累动态变化的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 495–499
Zhan X M, Han X R, Yang J F, et al. Dynamics changes of dry matter accumulation of maize as affected by different quantity of nitrogen and phosphorus and potassium[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(3): 495–499

[6] 张仁和, 胡富亮, 杨晓钦, 等. 不同栽培模式对旱地春玉米光合特性和水分利用率的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(9): 1619–1627
Zhang R H, Hu F L, Yang X Q, et al. Effects of different cultivation patterns on photosynthetic characteristics and water use efficiency in dry land spring maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(9): 1619–1627

[7] 陈庆瑞, 冯文强, 涂仕华, 等. 四川盆中丘陵区不同台位旱坡地土壤养分状况研究[J]. 西南农业学报, 2002, 15(1): 74–78
Chen Q R, Feng W Q, Tu S H, et al. Study on nutrient status in sloping uplands of Sichuan hilly areas[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2002, 15(1): 74–78

[8] 许宗林, 苟曦, 李昆, 等. 四川省耕地土壤养分分布特征与动态变化趋势探讨[J]. 西南农业学报, 2008, 21(3): 718–723
Xu Z L, Gou X, Li K, et al. Distribution and characteristics of cultivated soil nutrients and its dynamic change trend in Sichuan Province[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(3): 718–723

[9] 国家统计局. 2014 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014: 457–461
National Bureau of Statistics of China. China Statistics Yearbook 2014[M]. Beijing: China Statistics Press, 2014: 457–461

[10] Vance C P, Uhde-Stone C, Allan D L. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource[J]. New Phytologist, 2003, 157(3): 423–447

[11] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915–924
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915–924

[12] 王晓慧, 曹玉军, 魏雯雯, 等. 我国北方 40 个高产春玉米品种的磷素利用特性[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 580–589
Wang X H, Cao Y J, Wei W W, et al. Phosphorus utilization characteristics of forty spring maize hybrids with high-yielding potential in north of China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2015, 21(3): 580–589

[13] 赵长海, 逄焕成, 李玉义. 水磷互作对潮土玉米苗期生长及磷素积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 236–240
Zhao C H, Pang H C, Li Y Y. Effect of interaction of water and phosphorus on maize growth and phosphorus accumulation in fluvo-aquic soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(1): 236–240

[14] 李绍长, 胡昌浩, 龚江, 等. 供磷水平对不同磷效率玉米氮、钾素吸收和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(3): 237–240
Li S C, Hu C H, Gong J, et al. Effects of phosphorus supply on nitrogen and potassium absorption and distribution of maize with different phosphorus efficiency[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2004, 10(3): 237–240

[15] 章爱群, 贺立源, 门玉英, 等. 磷水平对不同耐低磷玉米基因型幼苗生长和养分吸收的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(3): 347–350
Zhang A Q, He L Y, Men Y Y, et al. Effect of phosphorus levels on growth and nutrient absorption of low-P tolerant maize seedlings[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2008, 14(3): 347–350

[16] 袁硕, 李春俭, 彭正萍, 等. 磷对不同玉米品种生长、体内磷循环和分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(2): 310–316
Yuan S, Li C J, Peng Z P, et al. Effects of phosphorus on the plant growth, phosphorus cycling and distribution in different maize cultivars[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(2): 310–316

[17] 张可炜, 李坤朋, 刘治刚, 等. 磷水平对不同基因型玉米苗期磷吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5):

795–801
Zhang K W, Li K P, Liu Z G, et al. Effect of phosphorus level on phosphorus absorption and utilization of different genotype maize seedlings[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2007, 13(5): 795–801

[18] 李晓艳, 孙立, 吴良欢. 不同吸硅型植物各器官硅素及氮、磷、钾素分布特征[J]. 土壤通报, 2014, 45(1): 193–198
Li X Y, Sun L, WU L H. The distribution of silicon, nitrogen, phosphorus and potassium in the organs of different silicon-absorbing plants[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(1): 193–198

[19] Ma J F, Yamaji N. Silicon uptake and accumulation in higher plants[J]. Trends in Plant Science, 2006, 11(8): 392–397

[20] De Melo S P, Monteiro F A, De Bona F D. Silicon distribution and accumulation in shoot tissue of the tropical forage grass *Brachiaria brizantha*[J]. Plant and Soil, 2010, 336(1/2): 241–249

[21] Tavakkoli E, English P, Guppy C N. Interaction of silicon and phosphorus mitigate manganese toxicity in rice in a highly weathered soil[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2011, 42(5): 503–513

[22] 刘慧霞, 郭正刚. 不同土壤水分条件下添加硅对紫花苜蓿茎叶和土壤氮磷钾含量的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2011, 17(6): 809–813
Liu H X, Guo Z G. Effects of supplementary silicon on nitrogen, phosphorus and potassium contents in the shoots of *Medicago sativa* plants and in the soil under different soil moisture conditions[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2011, 17(6): 809–813

[23] Xie Z M, Song R, Shao H B, et al. Silicon improves maize photosynthesis in saline-alkaline soils[J]. The Scientific World Journal, 2015, doi: 10.1155/2015/245072

[24] 杨超光, 豆虎, 梁永超, 等. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 116–121
Yang C G, Dou H, Liang Y C, et al. Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by maize in cadmium-contaminated soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(1): 116–121

[25] 龚金龙, 胡雅杰, 龙厚元, 等. 不同时期施硅对超级稻产量和硅素吸收、利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(8): 1475–1488
Gong J L, Hu Y J, Long H Y, et al. Effect of application of silicon at different periods on grain yield and silicon absorption, use efficiency in super rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(8): 1475–1488

[26] 陆福勇, 江立庚, 秦华东, 等. 不同氮、硅用量对水稻产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(6): 846–850
Lu F Y, Jiang L G, Qin H D, et al. Effects of nitrogen and silicon levels on grain yield and qualities of rice[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(6): 846–850

[27] 张月玲, 王宜伦, 谭金芳, 等. 氮硅配施对夏玉米抗倒性和产量的影响[J]. 玉米科学, 2012, 20(4): 122–125
Zhang Y L, Wang Y L, Tan J F, et al. Effect of nitrogen application combined with silicon on the lodging-resistance and the yield of summer corn[J]. Journal of Maize Sciences, 2012, 20(4): 122–125

[28] 周青, 潘国庆, 施作家, 等. 玉米施用硅肥的增产效果及其对群体质量的影响[J]. 玉米科学, 2012, 10(1): 81–83
Zhou Q, Pan G Q, Shi Z J, et al. Increasing production efficiency of using Si and the influence on quality of population in maize[J]. Journal of Maize Science, 2012, 10(1): 81–83

[29] 杨永, 石海春, 柯永培, 等. 几个玉米自交系和杂交种耐低磷能力的研究[J]. 玉米科学, 2007, 15(5): 12–16
Yang Y, Shi H C, Ke Y P, et al. Study on the ability of low phosphorus tolerance of some maize inbred lines and hybrids[J]. Journal of Maize Sciences, 2007, 15(5): 12–16

[30] Yang Y, Li J W, Shi H C, et al. Alleviation of silicon on low-P stressed maize (*Zea mays* L.) seedlings under hydroponic culture conditions[J]. World Journal of Agricultural Sciences, 2008, 4(2): 168–172

[31] Owino-Gerroh C, Gascho G J. Effect of silicon on low pH soil phosphorus sorption and on uptake and growth of maize[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2005, 35(15/16): 2369–2378

[32] 李仁英, 沈孝辉, 谢晓金, 等. 施硅对土壤–水稻系统中磷迁移的影响[J]. 土壤通报, 2014, 51(2): 423–428
Li R Y, Shen X H, Xie X J, et al. Effect of silicon on translocation of phosphorus in soil-rice system[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(2): 423–428

[33] Mehrabanjoubani P, Abdolzadeh A, Sadeghipour H R, et al. Silicon affects transcellular and apoplastic uptake of some nutrients in plants[J]. Pedosphere, 2015, 25(2): 192–201

[34] 朱从桦, 谢孟林, 郭萍, 等. 硅、磷配施对玉米氮钾养分吸收利用的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(6): 1489–1496
Zhu C H, Xie M L, Guo P, et al. Effects of phosphorus and silicon application on uptake and utilization of N, K by maize[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(6): 1489–1496

[35] 彭正萍, 张家铜, 袁硕, 等. 不同供磷水平对玉米干物质和磷动态积累及分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 793–798
Peng Z P, Zhang J T, Yuan S, et al. Effects of different phosphrus application rates on the dynamic accumulation and distribution of dry matter and phosphrus in maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(4): 793–798